

0,01–0,02 Гц, необходимо каким-то образом увеличивать число бинов ДПФ. Для решения выявленной проблемы предложено обобщение ДПФ в виде параметрического дискретного преобразования Фурье (ДПФ-П).

Прямое ДПФ-П (матричная форма).

$$S_{N,\theta} = \frac{1}{N} F_{N,\theta} X_N; \quad 0 \leq \theta < 1; \quad (4)$$

где $X_N = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T$ – задание дискретного сигнала $x(n)$, $n = 0, \overline{N-1}$, в виде вектора N -мерного линейного пространства; T – знак транспонирования;

$S_{N,\theta} = [s(0, \theta), s(1, \theta), \dots, s((N-1), \theta)]^T$ – вектор бинов ДПФ-П, полученных путем измерения спектра в системе параметрических дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ-П), которая задается матрицей $F_{N,\theta}$.

$$F_{N,\theta} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & \dots & (N-1) \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ (N-1) \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & W_N^\theta & \dots & W_N^{\theta(N-1)} \\ 1 & W_N^{(1+\theta)} & \dots & W_N^{(1+\theta)(N-1)} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 1 & W_N^{(N-1+\theta)} & \dots & W_N^{(N-1+\theta)(N-1)} \end{bmatrix} \end{matrix} \end{matrix}; \quad (5)$$

УДК 621.3.049

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ С СОВМЕЩЕНИЕМ ПРОЦЕДУР КАЛИБРОВКИ

Воробей Р.И.¹, Гусев О.К.¹, Свистун А.И.¹, Тявловский К.Л.¹, Шадурская Л.И.¹, Жуковский П.В.², Тявловский А.К.¹

¹Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²Люблинский технический университет

Люблин, Польша

Сущность оптических методов заключается в регистрации абсолютной и относительной интенсивностей спектральных линий, полуширины, формы контуров спектральных линий и т.п. Важной задачей при разработке принципов построения систем оптической диагностики является оценка возможностей первичных преобразователей системы на основе фотоэлектрических преобразователей. Расширение функциональности измерительных приборов и систем технической диагностики связано с применением оптико-электронных элементов, в частности, оптических волоконных чувствительных элементов [1–3], а также фотодетекторов с расширенными функциональными возможностями [4]. Их применение в контроле производственных процессов и изделий связано с рядом преимуществ:

- химическая инертность;
- малый вес и размеры;

где ДЭФ-П определяются следующим соотношением:

$$def_{N,p}(k, n, \theta) = W_N^{(k+\theta)n} = \exp\left[-j \frac{2\pi}{N} (k + \theta)n\right];$$

$$k = \overline{0, (N-1)}, \quad n = \overline{0, (N-1)}, \quad 0 \leq \theta < 1.$$

В работе доказано, что для уменьшения погрешности измерения частот гармонических компонент сигнала в R раз, применение БПФ-П в сравнении с БПФ позволяет сократить число операций в $\frac{(\log_2 N + \log_2 R)}{\log_2 N}$ раз, а по необходи-

мому объему оперативной памяти в R раз.

Одно из актуальных приложений предложенного метода технического диагностирования – применение в современных системах автоматизированной интеллектуальной диагностики электрических машин.

Литература

1. Systems Analysis of Discrete Two-Dimensional Signal Processing in Fourier Basis // Advances in Signal Processing. Theories, Algorithms, and System Control. Editor: Margarita Favorskaya, Lakmi C. Jain. // Springer, 2020.

– нечувствительность к электромагнитным помехам и возмущениям, отсутствие генерируемых электромагнитных помех, способных влиять на другие цепи;

– безопасность эксплуатации, ввиду электрической изоляции и малой мощности оптического излучения;

– устойчивость и надежность, определяющие малые эксплуатационные затраты.

Дополнительные преимущества обеспечивает возможность интегрирования в одну систему оптического волоконного сенсора и волоконно-оптической линии связи [5].

В общем случае выходной сигнал оптического сенсора является сигналом со случайными нефиксированными параметрами различной физической природы, изменяющимися в некотором диапазоне значений. Большинство оптических сенсоров для определения значения измеряемой

величины используют изменение плотности мощности оптического излучения. Следовательно, для реализации измерений с малой погрешностью необходимо высокоточное измерение интенсивности оптического излучения, попадающего на фотодетектор. Однако величина выходного сигнала оптического чувствительного элемента, кроме воздействия измеряемой физической величины, может изменяться и по другим причинам:

– Интенсивность излучения источника света изменяется в зависимости от температуры и срока службы. Например, на интенсивность излучения ламп существенно влияет старение нити накаливания и напряжение питания, изменение оптических свойств баллона лампы. Светодиоды имеют значительный срок службы, но интенсивность их оптического излучения существенно зависит от температуры и изменяется в процессе эксплуатации вследствие деграционных процессов. Кроме того, изменение напряжения питания приводит к изменению спектрального распределения интенсивности излучения.

– На оптические компоненты схемы могут воздействовать различные внешние факторы, например, механические.

– Чувствительность приемника и интенсивность излучения источника света характеризуются большими технологическими разбросами, меняются вследствие температурных факторов, а также зависят и от длины волны.

На погрешность измерения влияют и ряд других факторов, причем, в различных сочетаниях. Наличие совокупности некоррелированно изменяющихся дестабилизирующих факторов приводит к значительному увеличению погрешности измерений и ошибкам контроля в системах оптической диагностики. Часто введение мер по стабилизации режимов функционирования излучателя и приемника недостаточно для снижения погрешности измерения. Следовательно, для достижения высоких метрологических характеристик оптических сенсоров в оптико-электронных узлах измерительных систем необходимо использовать процедуру сравнения или калибровки (эталонирования) непосредственно в процессе измерения. Для уменьшения ошибок преобразования разработано несколько схем [3, 6]. Системы калибровки сенсоров в процессе измерения используют какой-либо вид измерения отношений (рисунок 1).

В качестве сенсоров в измерительных преобразователях систем оптической диагностики могут использоваться различные пассивные и активные чувствительные элементы [1–4], а измеряемая величина M может иметь и оптическую природу. В этом случае, в качестве измерительного сигнала может использоваться оптический сигнал S_1 . Известно большое число разновидно-

стей фотоэлектрических сенсоров, в том числе, обладающих функциональными свойствами, и позволяющими одновременно измерять несколько контролируемых воздействий различной физической природы [1–4, 6].

Схемы калибровки двойного детектирования (рисунок 1, а), двухволновая схема с широкополосным источником (б), двухволновая схема с двумя источниками (в) используют либо два источника оптического излучения, либо два фотодетектора, либо измерения производятся с мультиплексированием по длине волны излучения. При использовании функциональных датчиков измеряемая величина M может иметь различную физическую природу, а в качестве дополнительной измеряемой величины или управляющим свойствами сенсора воздействием могут использоваться сигналы S_1, S_2 [4]. Также на рисунке 1 приведены: D – фотодетектор, F – оптические фильтры, Y – оптические разветвители.

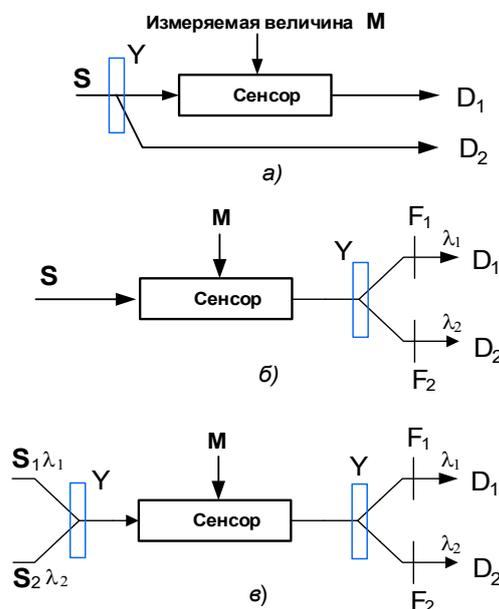


Рисунок 1 – Схемы калибровки сенсоров

Отметим, что все схемы автокалибровки требуют применения фотодетекторов D_1 и D_2 с идентичными характеристиками. Кроме того, введение в схему калибровки-измерения дополнительных оптических элементов F, Y также предъявляет повышенные требования к стабильности их параметров. Рассмотренные системы требуют применения либо двух фотоприемников, либо двух источников оптического излучения, что предъявляет высокие требования к идентичности их параметров, стабильности характеристик, усложняет оптическую схему. При этом погрешность измерения в первую очередь определяется идентичностью и временной стабильностью параметров фотодетекторов D_1, D_2 , поэтому в качестве фотодетекторов целесообразно

но использовать элементы интегрального многоэлементного фотоприемника. Дополнительным требованием к системе совмещенной калибровки-измерения является превышение быстродействия фотодетекторов скорости изменения входного воздействия, что позволяет считать измерения статическими.

При оценке погрешности процедур измерения и калибровки оптических сенсоров необходимо учитывать следующие факторы: ΔS – погрешность, вносимая изменением плотности мощности источника света, $\Delta \lambda$ – погрешность, вносимая изменением длины волны источника света, ΔT – погрешность, вносимая отклонением температуры и других внешних факторов от номинальных значений, ΔS_{D1} и ΔS_{D2} – погрешности калибровки первого и второго фотоприемников по плотности мощности, $\Delta \lambda_{D1}$ и $\Delta \lambda_{D2}$ – погрешности калибровки первого и второго фотоприемников по длине волны, ΔP_{D1} и ΔP_{D2} – погрешности, вносимые преобразователями сигналов первого и второго фотоприемников в электрический сигнал, Δk_1 и Δk_2 – мультипликативные составляющие погрешности первого и второго фотоприемников. Следует также учесть, что величины ΔS_{D1} , ΔS_{D2} , $\Delta \lambda_{D1}$, $\Delta \lambda_{D2}$, ΔP_{D1} и ΔP_{D2} являются независимыми случайными величинами, а их объединения подчиняются нормальному закону распределения вероятностей. Таким образом, математическая модель погрешности процедуры калибровки может быть записана как $\Delta M = \Delta k_2 M + (\Delta S_{D2} * \Delta \lambda_{D2} * \Delta P_{D2}) * (\Delta S_{D1} * \Delta \lambda_{D1} * \Delta P_{D1})$. Отсюда следует, что схемы двойного детектирования (рисунок 1, а, б) обеспечивают компенсацию возмущающих воздействий, действующих на входе средства измерений, но при этом вносятся дополнительные составляющие в аддитивную погрешность результата измерения, обусловленные обобщенным возмущающим воздействием, действующим на выходе средства измерений, а мультипликативная составляющая погрешности остается неизменной. Схема с двумя источниками (рисунок 1, в) аналогичным образом увеличивает аддитивную погрешность результата измерения, обусловленную обобщенным возмущающим воздействием на входе средства измерений.

Указанные недостатки традиционных методов частично или полностью могут быть устранены путем реализации процедуры многопараметрических измерений на основе односигнальной модели [6] с использованием двухбарьерных [7] одноэлементных фотодетекторов (рисунок 2).

Поверхностно-барьерные структуры с двумя потенциальными барьерами с глубокими многозарядными примесями в ОПЗ, сформированные с противоположных сторон приборной структуры, и образующие два встречно включенных диода Шоттки, разделенных длиной базой, демон-

стрируют зависимость выходного сигнала от длины волны, интенсивности излучения, величины приложенного напряжения [8].

Приборная структура фотоприемника содержит несколько физически различных и электрически связанных областей, а использование процессов в такой структуре обеспечивает многофункциональность фотоприемника за счет формирования выходного сигнала, связанного с изменением нескольких входных параметров [4, 6–7].

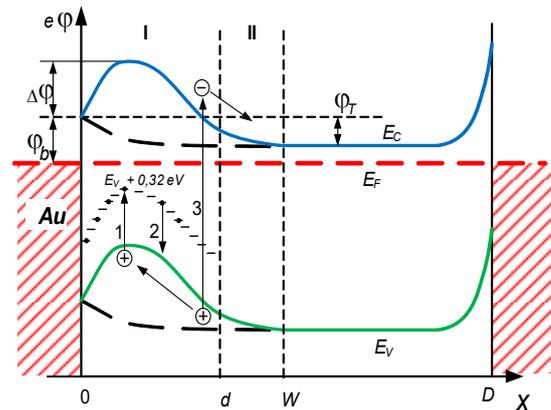


Рисунок 2 – Структура двухбарьерного фотоприемника с внутренним усилением в области I

Существенной особенностью двухбарьерных фотодетекторов является инверсия знака спектральной характеристики чувствительности приемника оптического излучения на некоторой длине волны λ_0 (рисунок 3), причем значение λ_0 для конкретного фотоприемника не зависит от интенсивности оптического излучения.

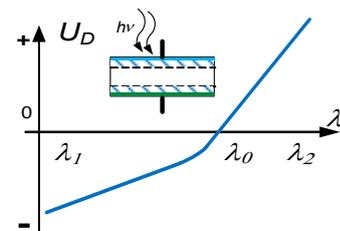


Рисунок 3 – Передаточная характеристика измерительного преобразователя на базе двухбарьерного фотоприемника

Значение длины волны инверсии знака спектральной характеристики и диапазон длин волн чувствительности двухбарьерного фотоприемника λ_0 , λ_1 , λ_2 определяются технологией и материалом, на основе которого изготавливается приемник [4, 7]. Типичный реализуемый диапазон измерения длины волны составляет для разных фотоприемников от 1,2 до 2,4 мкм. Конкретные диапазоны и коэффициенты преобразования определяются типом материала основного материала, материала примеси, конструктивно-технологических характеристик. Кроме того,

положение характерных точек λ_0 , λ_1 , λ_2 на спектральной характеристике чувствительности может быть изменено регулировкой напряжения смещения фотодетектора.

Естественно, что при выборе параметров источников сигнала S , для обеспечения максимального динамического диапазона преобразователя и минимальной погрешности процедур измерения/калибровки необходимо подобрать их параметры так, чтобы значения длин волн излучения источника света были как можно ближе к экстремумам спектральной характеристики двухбарьерного фотоприемника [4, 6].

Использование двухбарьерного фотодетектора приводит к двум схемам калибровки (рисунок 4) измерительных преобразователей систем оптической диагностики, основанных на традиционных двухволновых схемах калибровки (рисунок 1).

Схема с широкополосным источником (рисунок 4, а) использует один источник и один фотодетектор и не содержит каких-либо дополнительных оптических элементов. В схеме рисунок 4, а используются электрические фильтры F_{E1} и F_{E2} , осуществляющие разделение электрических сигналов, соответствующих длинам волн λ_1 и λ_2 . При этом, на одной из длин волн оптического излучения, например, λ_1 , производится измерение величины параметра M , а на другой длине волны – λ_2 осуществляется калибровка фоточувствительного сенсора. Излучение на длине волны λ_0 может использоваться для процедуры калибровки самого двухбарьерного фотодетектора и схем обработки сигналов фотодетектора. Использование в процедурах измерения и калибровки одних и тех же оптических элементов исключает влияние разброса параметров оптических элементов на погрешность измерения.

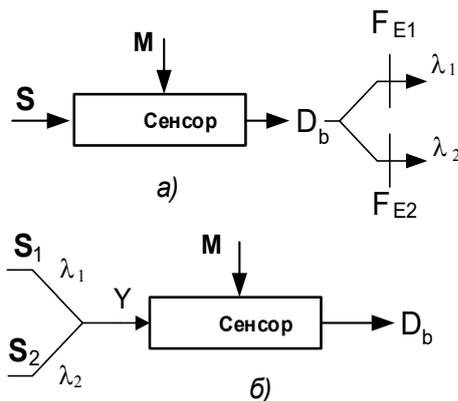


Рисунок 4 – Двухволновая схема с широкополосным источником (а); двухволновая схема с двумя источниками (б) калибровки измерительного преобразователя с использованием двухбарьерного фотоприемника

В процессе измерения с калибровкой производится анализ соотношений двух измерительных

сигналов на разных длинах волн при использовании широкополосного или двухволнового источника оптического излучения. Отметим, что определение параметров оптического излучения на разных длинах волн производится в одном и том же элементе приемника, что исключает влияние неидентичности характеристик фотодетекторов на погрешность измерений в схемах, приведенных на рисунке 1. Процедура калибровки производится с разделением по времени.

В отличие от традиционных схем калибровки применение двухбарьерного фотодетектора приводит к тому, что оба измерительных канала реализуются в одних и тех же конструктивных элементах. Один и тот же объем полупроводниковой структуры двухбарьерного фотодетектора используется при формировании измерительных сигналов на длинах волн λ_1 и λ_2 . При этом, применение двухбарьерного фотоприемника, благодаря разнополярности отклика на длинах волн λ_1 и λ_2 и идентичности характеристик фотоприемника при обработке сигналов S_1 и S_2 (используется один и тот же объем сенсорной структуры), аналогично применению в электрической эквивалентной схеме дифференциального усилителя. Математическое описание модели составляющих погрешности измерительного преобразователя с двухбарьерным фотодетектором приводится к виду

$$\Delta M = (\Delta k_1 - \Delta k_2) M + (\Delta S_2 * \Delta \lambda_2 * \Delta P_2) - (\Delta S_1 * \Delta \lambda_1 * \Delta P_1),$$

где * – символ объединения погрешностей, ΔS_1 , $\Delta \lambda_1$, ΔP_1 и ΔS_2 , $\Delta \lambda_2$, ΔP_2 – составляющие погрешности фотоприемника при измерениях на длине волны λ_1 и λ_2 соответственно; Δk_1 и Δk_2 – мультипликативные составляющие погрешности средства измерений на этих же длинах волн. Для независимых погрешностей объединение определяется как корень квадратный из суммы квадратов их относительных величин. В данном случае перечисленные величины не являются независимыми, поскольку характеризуют один и тот же двухбарьерный фотодетектор. В случае если в этих погрешностях преобладает систематическая составляющая, их можно считать коррелированными с коэффициентом корреляции, стремящемся к единице, что позволяет заменить символ объединения символом арифметической разности. Тогда погрешность калибровки и измерения сенсора на базе двухбарьерного одноэлементного фотоприемника оказывается меньшей, чем погрешность традиционных методов с использованием отдельных элементов. Составляющие погрешности фоточувствительного сенсора, вызванные неидентичностью характеристик фотодетекторов исключаются. Исключаются также погрешности, связанные с градиентом распределения внешних факторов, например, температуры между чувствительными элементами фотодетектора. В двухбарьерном фотодетекторе измерение

параметров оптического излучения на различных длинах волн производится в одном и том же физическом объеме чувствительного элемента. При выборе пары источник оптического излучения – фотодетектор для обеспечения максимального динамического диапазона преобразователя и минимальной погрешности измерения необходимо подобрать их параметры так, чтобы значения длин волн излучения источника света были как можно ближе к экстремумам спектральной характеристики двухбарьерного фотодетектора [4].

Применение двухбарьерных фотоприемников в схемах измерительных преобразователей систем оптической диагностики позволяет реализовать процедуру калибровки непосредственно в процессе измерения.

Схемы калибровки измерительных преобразователей систем оптической диагностики с двухбарьерным фотодетектором позволяют исключить ряд погрешностей, связанных с неидентичностью отдельных фотодетекторов и элементов различных оптических измерительных каналов, существенно уменьшить другие составляющие погрешности измерения.

Применение одноэлементных двухбарьерных фотодетекторов в схемах калибровки измерительных преобразователей систем оптической диагностики позволяет исключить диспергирующие элементы, что приводит к упрощению оптической схемы измерения с одновременным улучшением метрологических характеристик измерительных преобразователей систем оптической диагностики.

УДК 629.3.05:629.762

ПИЛОТАЖНО-НАВИГАЦИОННЫЙ МОДУЛЬ СО ВСТРОЕННЫМ АЛГОРИТМОМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИЕЙ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПО СИГНАЛАМ ОТ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Черняковский Д.Н., Односторонцев А.А., Михайлов А.О., Фёдорцев Р.В., Морошек П.М., Белов А.В.

ООО «НТЛаб-ИС»

Минск, Республика Беларусь

Процесс управления скоростными воздушными объектами с быстроменяющейся траекторией движения предусматривает решение комплекса взаимосвязанных задач, связанных со стабилизацией его движения и корректировкой направления полёта. Одним из таких исполнительных изделий является – пилотажно-навигационный модуль (ПНМ) (рисунок 1).

Для контроля и диагностики входящих в изделие элементов и антенного модуля, собирався стенд, представленный на рисунке 2. ПНМ и излучающую антенну располагали в безэховой камере.

При проведении стендовых испытаний по оценке функциональности работы данного изде-

Литература

1. Масол, И.В. Информационные нанотехнологии / И.В. Масол, В.И. Осинский, О.Т. Сергеев – Киев: изд-во Макрос, 2011. – 560 с.
2. Ермаков, О.Н. Прикладная оптоэлектроника / О.Н. Ермаков. – М.: Техносфера, 2004. – 416 с.
3. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
4. Гусев О. К., Тявловский К. Л., Воробей Р. И., Свистун А. И., Шадурская Л. И. Фотоприемники на основе собственных полупроводников для построения измерительных преобразователей. // Метрология и приборостроение. – 2017, № 2. – С.34–42.
5. Окоси Т. и др. Волоконно-оптические датчики. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
6. Гусев, О.К. и др. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями. / О.К. Гусев, Р.И. воробей, А.Л. Жарин, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский; под общ ред. О.К. Гусева – Минск: БНТУ, 2010. – 582 с.
7. Vorobey, R.I. Photoelectric semiconductor converters with a large dynamic range / R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky, A.I. Svistun, L.I. Shadurskaya, N.V. Yarzhembitskaya, K. Kierczynski // Przegląd elektrotechniczny, – Nr 5. 2014, – Pp. 75–78.
8. Воробей, Р.И. Измерительные преобразователи систем оптической диагностики с многофункциональными фотоприемниками / Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский, Л.И. Шадурская // Приборы и методы измерений, 2018. № 3. – С. 215–226.
9. Назаров Н. Г. Метрология. Основные понятия и математические модели. – М.: Высш. шк., 2002. – 348 с.

лия осуществляется оценка следующих выходных показателей:

- геодезические координаты (WGS-84);
- проекции вектора скорости;
- угловая ориентация и угловые скорости изделия;
- режим работы и статус внутренних модулей;
- отношение сигнал/шум для каждого спутника.

При формировании сигналов ГНСС в качестве имитатора использовался Spirent GSS6700 работающий на частоте L1 из одного шасси. Приёмник сигналов спутниковой навигационной системы (СНС) должен обеспечивать поиск и захват сигналов GPS, ГЛОНАСС, GALILEO,